



Optimización de cadenas de suministro de hidrógeno verde en Chile

XIV Jornadas Economía de la Energía: Análisis de Sistemas Acoplados en el Mercado Eléctrico

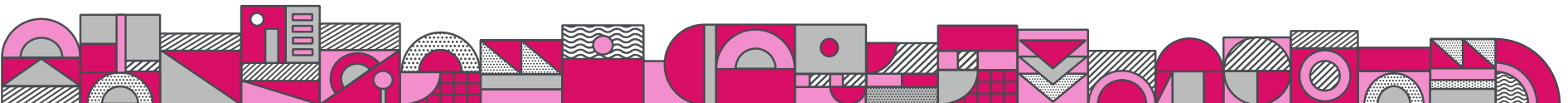
Co-investigadores: Tito Homem-de-Mello, Nicolás Allendes, UAI

Pedro Vargas, Enzo Sauma, David Pozo, MIGA

f.jalil-vega@ucl.ac.uk

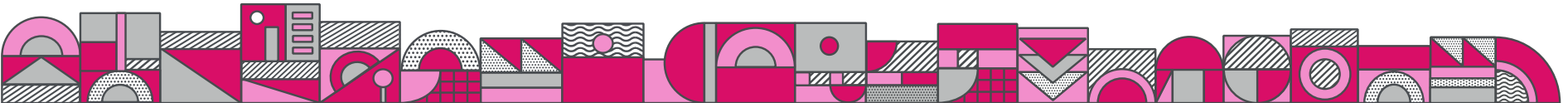
Agenda

1. Introducción
2. Metodología: Modelo Off-grid
3. Resultados
4. Discusión de costos
5. Metodología: Modelo On-grid
6. Comparación de resultados
7. Conclusión



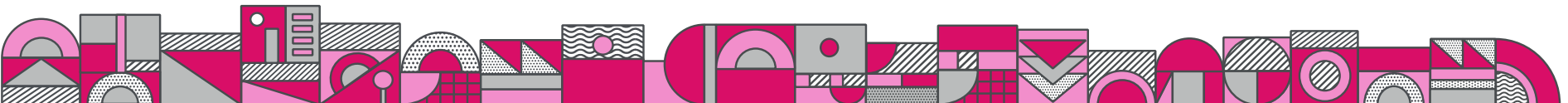
Introducción

- Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC):
 - Descarbonización al 2050 y metas intermedias
 - Reducción de 25% carbono negro en la próxima década respecto a niveles 2016
- Hidrógeno como alternativa para descarbonizar sectores “difíciles de descarbonizar” (transporte de carga, aviación, transporte marítimo, calor, industria)
- Chile presenta un potencial de producción de hidrógeno verde de bajo costo
- ¿Cuál es la configuración óptima de estas cadenas de suministro y cuáles son sus implicancias económicas y ambientales?



Definición del problema

- ¿Dónde construir la infraestructura de generación y transporte para aprovechar los recursos de forma óptima?
 - Dónde ubicar plantas solares/eólicas y de qué capacidad
 - Qué tecnologías de generación y electrólisis
 - Qué transportamos y desde/hacia dónde? (agua, electricidad, hidrógeno)
- ¿Cómo configurar la red para suministros de energía variables?
- ¿Cómo producir hidrógeno con recursos hídricos limitados?
 - Ubicación y capacidad de desalinización y transporte de agua

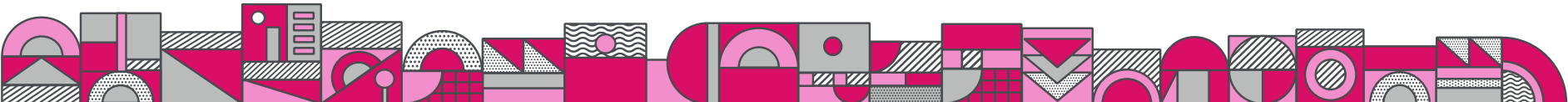


Metodología – Modelo off-grid

- Se propone un modelo de optimización lineal **geográficamente explícito** de cadenas de suministro de hidrógeno
- Minimiza el **costo nivelado del hidrógeno** (LCOH) en un horizonte de **2025-2050**, usando días típicos y resolución horaria
- Decisiones de inversión cada 5 años
- **6 escenarios de demanda:** E1 (demanda para exportación), y E2 (demanda interna)
- Modelo decide:
 - Ubicaciones y capacidades de tecnologías de generación eólica y solar
 - Ubicaciones, capacidades, y tipos de electrolizadores
 - Ubicaciones y capacidades de plantas desalinizadoras
 - Capacidades y trazados de líneas eléctricas, tuberías de agua, y transporte de hidrógeno (tuberías y camiones)
 - Operación horaria de tecnologías

Demanda anual de hidrógeno (Mt).
E1: Demanda para exportación
E2: Demanda interna

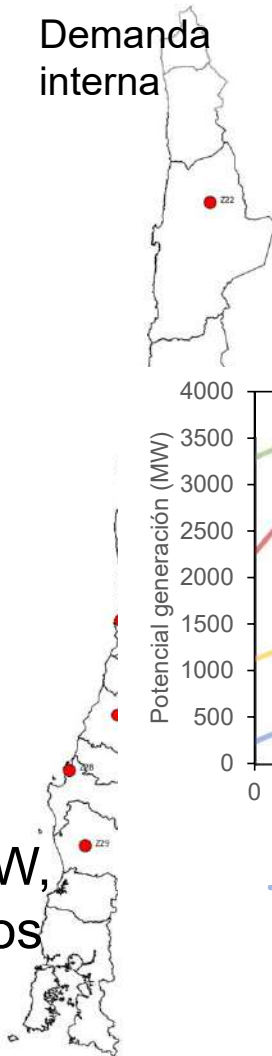
Year	E1.3	E1.5	E1.10	E1.15	E1.20	E2
2025	0	0	0	0	0	0.011
2030	0.11	0.19	0.38	0.57	0.77	0.023
3035	0.27	0.45	0.91	1.37	1.82	0.035
2040	0.43	0.72	1.44	2.16	2.88	0.046
2045	0.59	0.98	1.97	2.95	3.94	0.046
2050	0.75	1.25	2.5	3.75	5	0.046



Metodología

- Área modelada: SEN
- 2 escenarios:
 - Demanda interna
 - Demanda de exportación
- Zonas candidatas para plantas desalinizadoras
- Clusters de potenciales renovables (eólico: 50 GW, solar: 650 GW) candidatos para instalar generación

Demanda interna



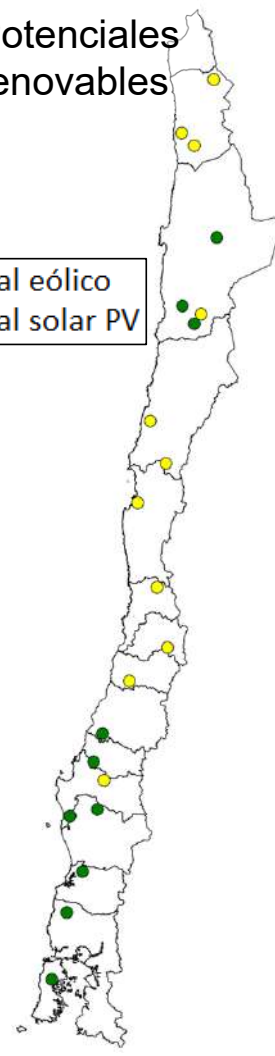
Demanda exportación



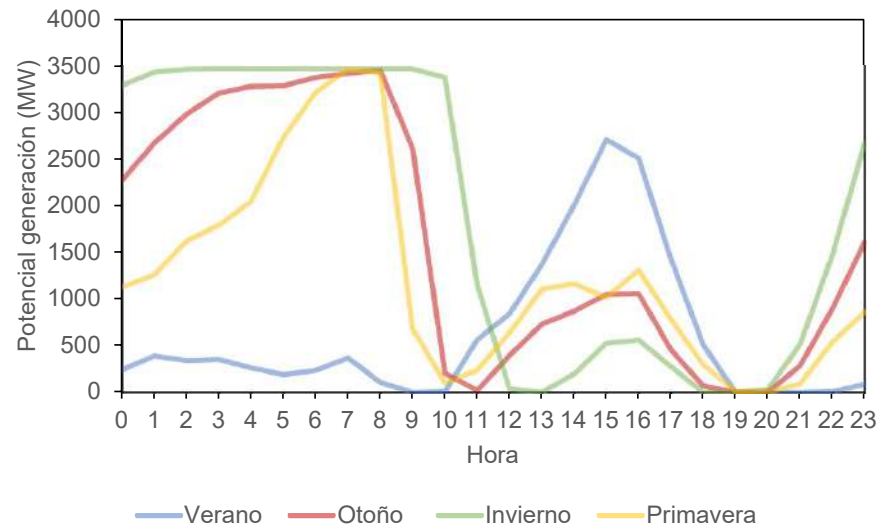
Candidatos desalinización



Potenciales renovables

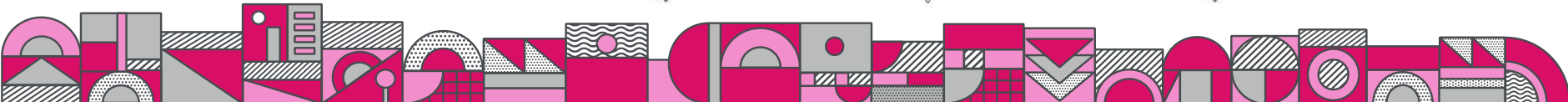


Ejemplo: Zona 1, perfiles eólicos



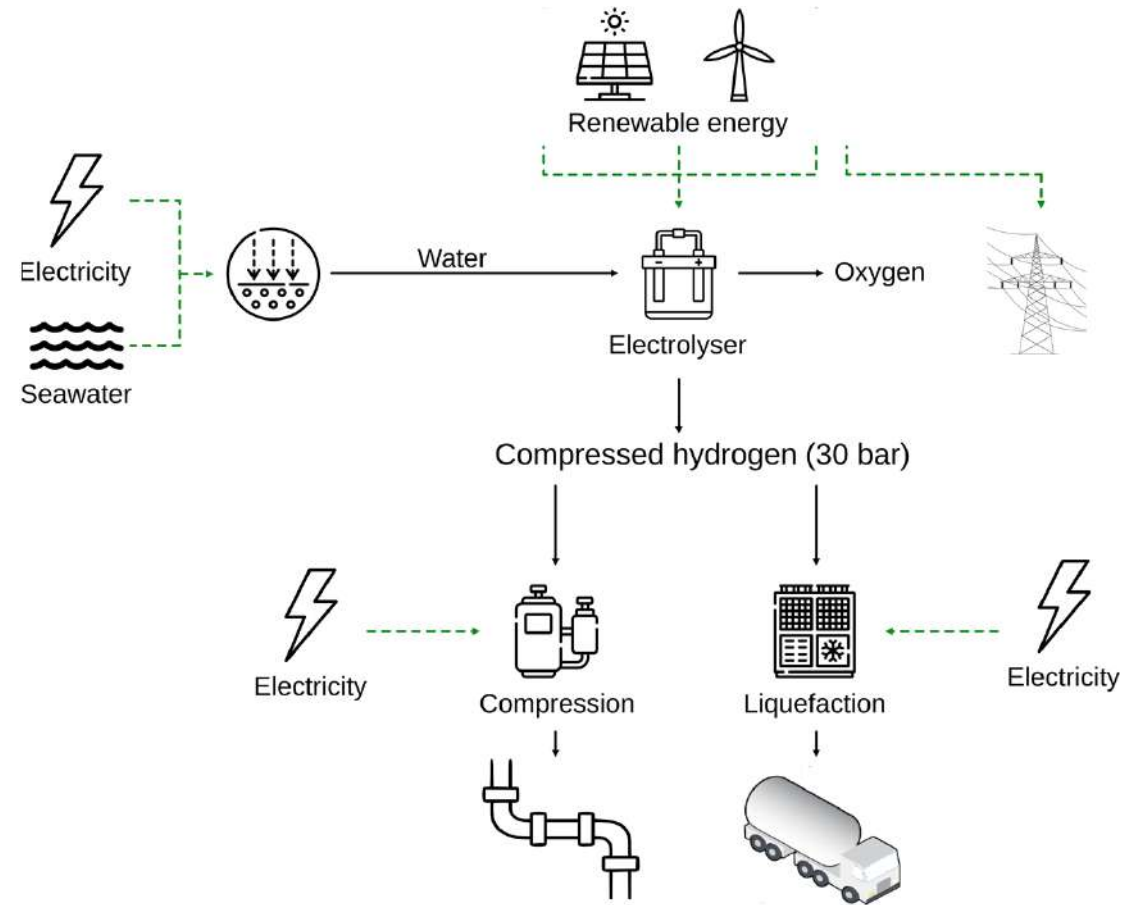
● Potencial eólico
● Potencial solar PV

— Verano — Otoño — Invierno — Primavera



Metodología

- Área modelada: SEN
- 2 escenarios:
 - Demanda interna
 - Demanda de exportación
- Zonas candidatas para plantas desalinizadoras
- Clusters de potenciales renovables (eólico: 50 GW, solar: 650 GW) candidatos para instalar generación



Metodología

• Modelo

○ Flujos

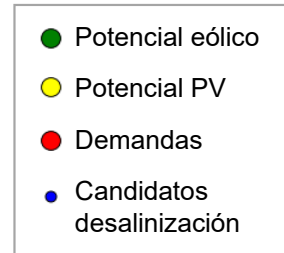
- Electricidad
- Hidrógeno
- Agua

○ Modos de transporte

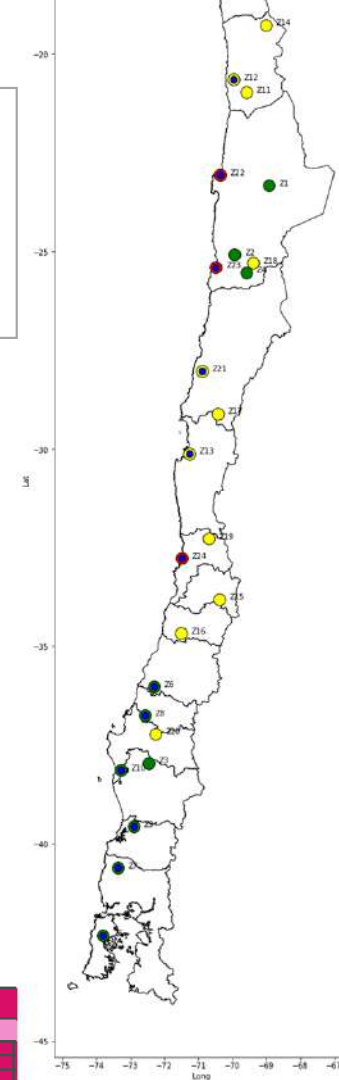
- Electricidad: Líneas de transmisión
- Hidrógeno: Tuberías, camiones de hidrógeno líquido
- Agua: Tuberías

○ Tecnologías de conversión

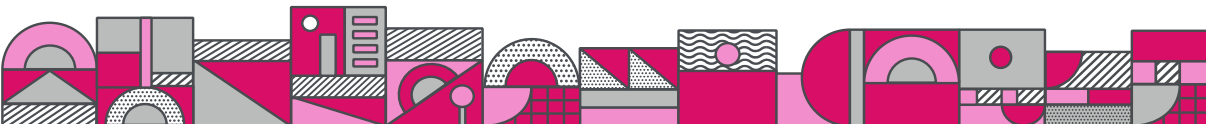
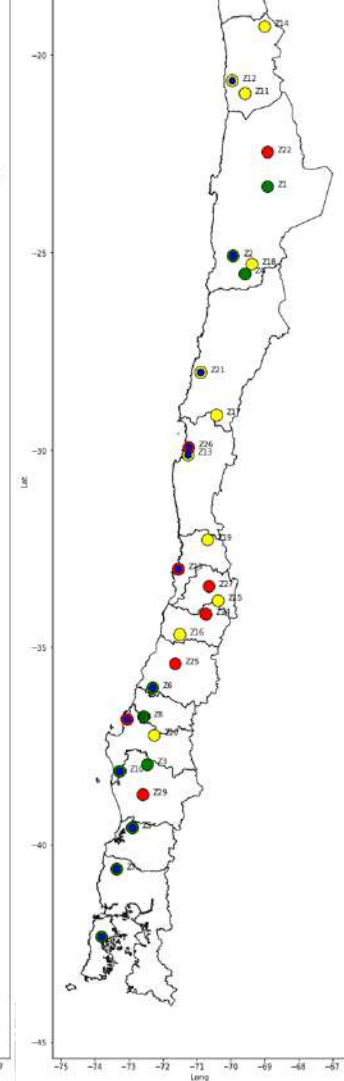
- Generación eléctrica: PV, turbinas eólicas
- Electrólisis: PEM
- Desalinización: Osmosis inversa



Escenario demanda exportación



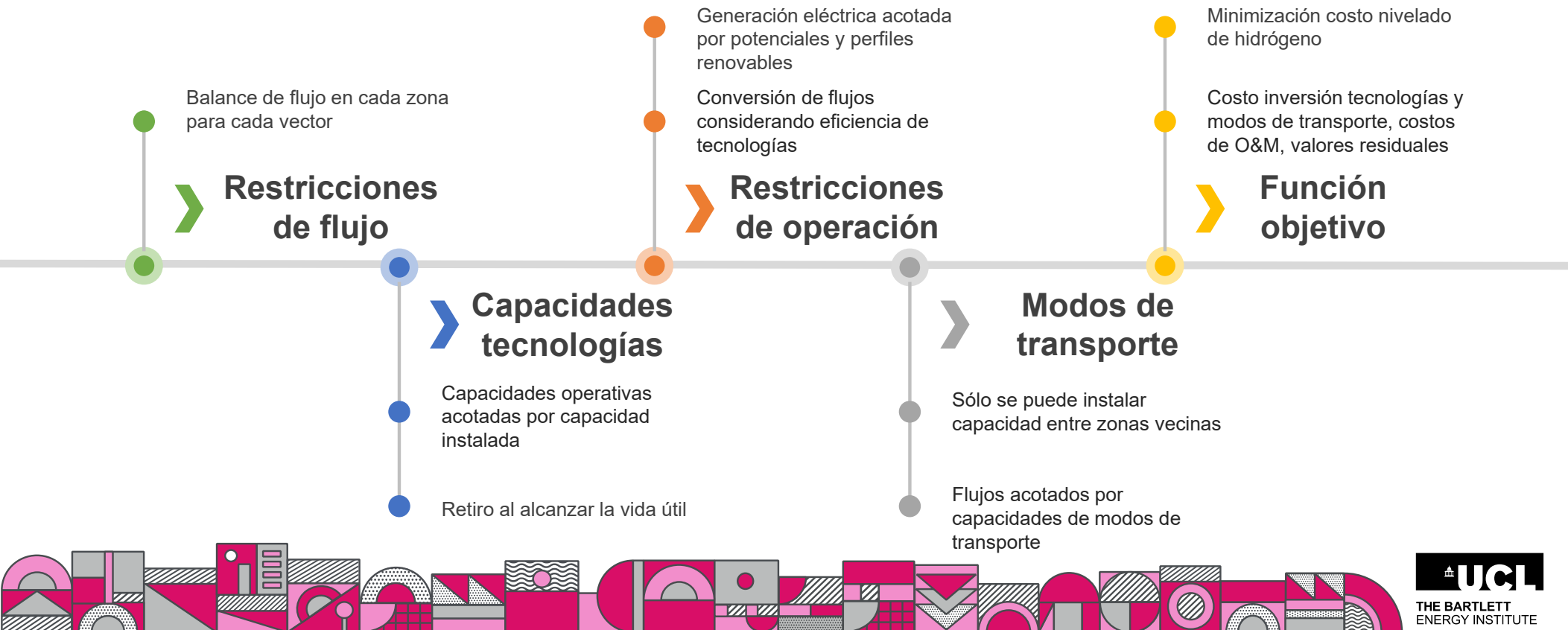
Escenario demanda intena



Metodología – Formulación

- Restricciones y función objetivo

$$LCOH = \frac{\sum_{t=2025}^{2050} \frac{I_t + O\&M_t - RV_{2050}}{(1+r)^{t-2020}}}{\sum_{t=2025}^{2050} \frac{H_2 Demand_t}{(1+r)^{t-2020}}}$$

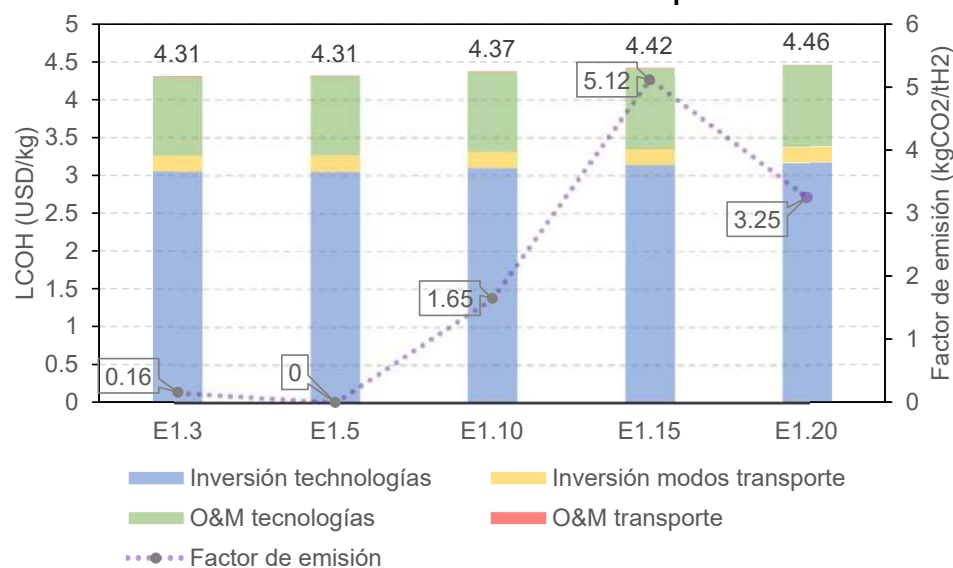


Resultados

Demanda total de hidrógeno período completo (Mt)

E1.3	E1.5	E1.10	E1.15	E1.20	E2
7.81	13.03	26.06	39.06	52.08	0.86

Descomposición LCOH y factores de emisión para escenarios de demanda de exportación



- Resultados principales para distintos escenarios de demanda:

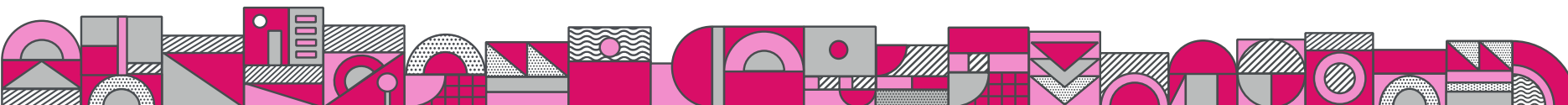
- Escenarios exportación:

- LCOH: 4.31 – 4.46 USD/kg
- Factor de emisión : 0 – 5.12 kgCO₂/tonH₂
- Consumo de agua : 70 – 469 Mt

- Escenario demanda interna:

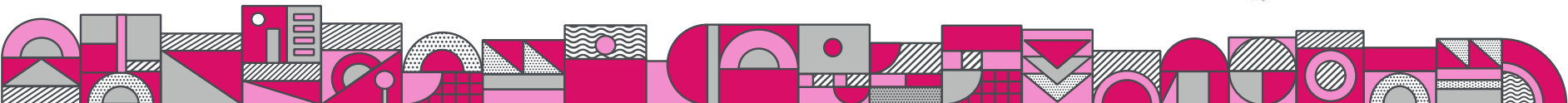
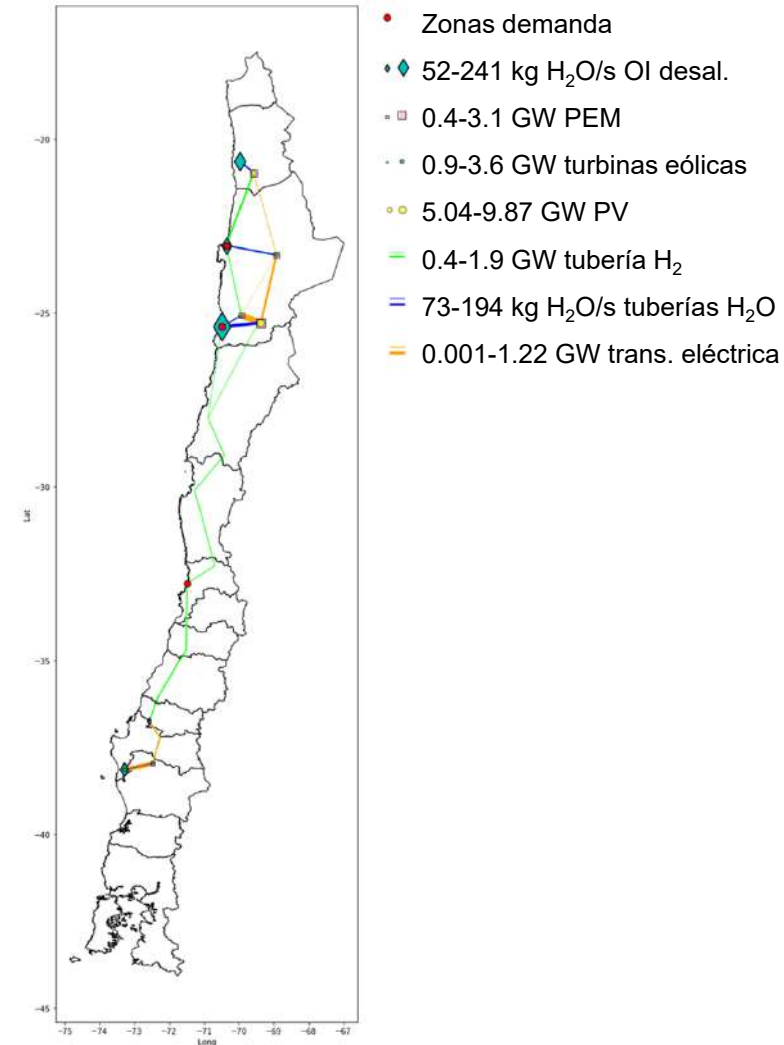
- LCOH: 6.26 USD/kg
- Factor de emisión: 1.09 kgCO₂/tonH₂
- Consumo de agua: 7.76 Mt

- Diferentes configuraciones de cadenas de suministro para distintas demandas



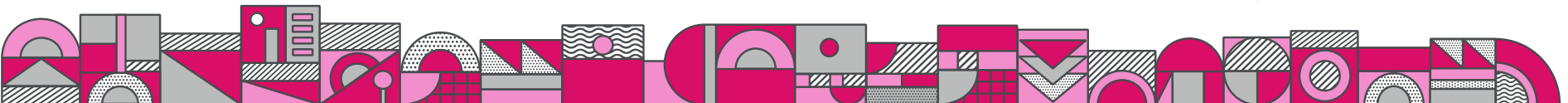
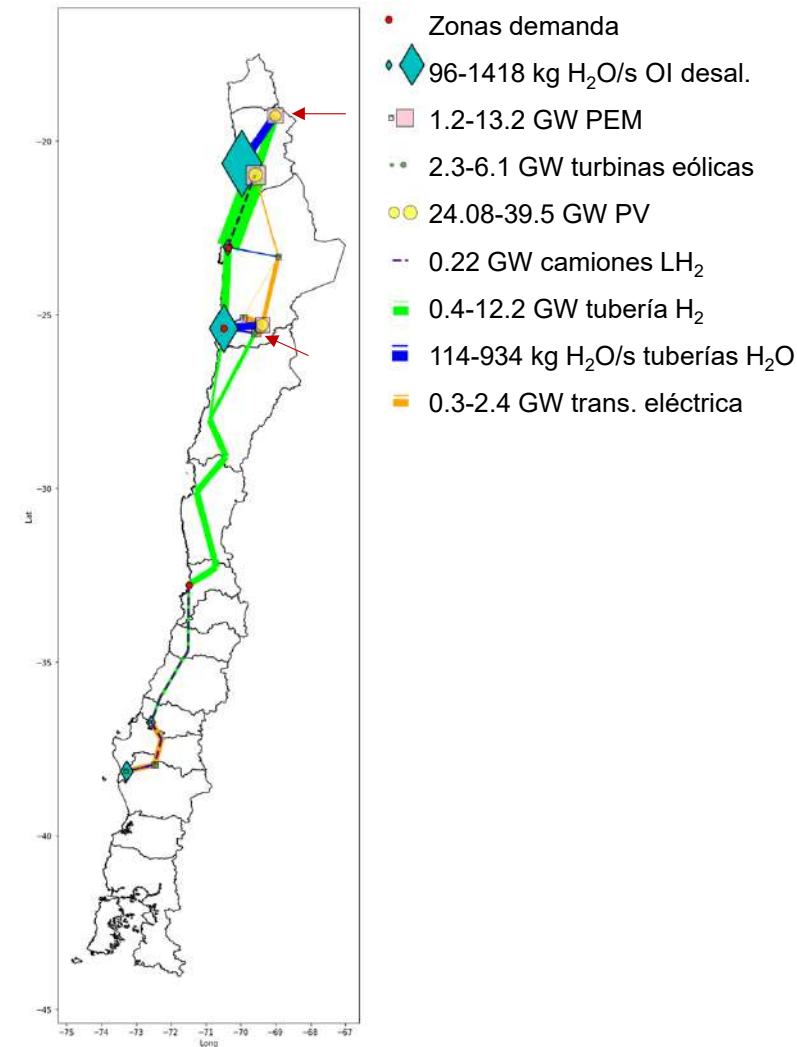
Resultados

- Escenario Exportación E1.5 año 2050
 - Concentración infraestructura en el norte
 - Se utilizan ambas fuentes renovables PV y eólico
 - Producción de hidrógeno en zonas interiores
 - Se distribuye agua a zonas interiores
 - Separa desalinización de producción de H₂
 - No se emplean camiones para distribución de H₂



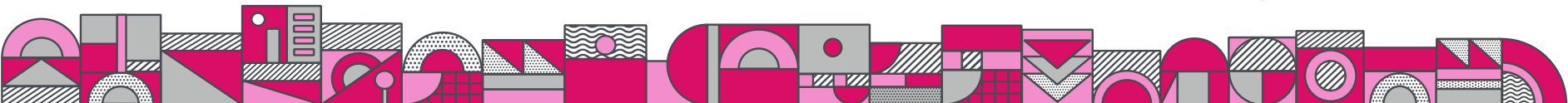
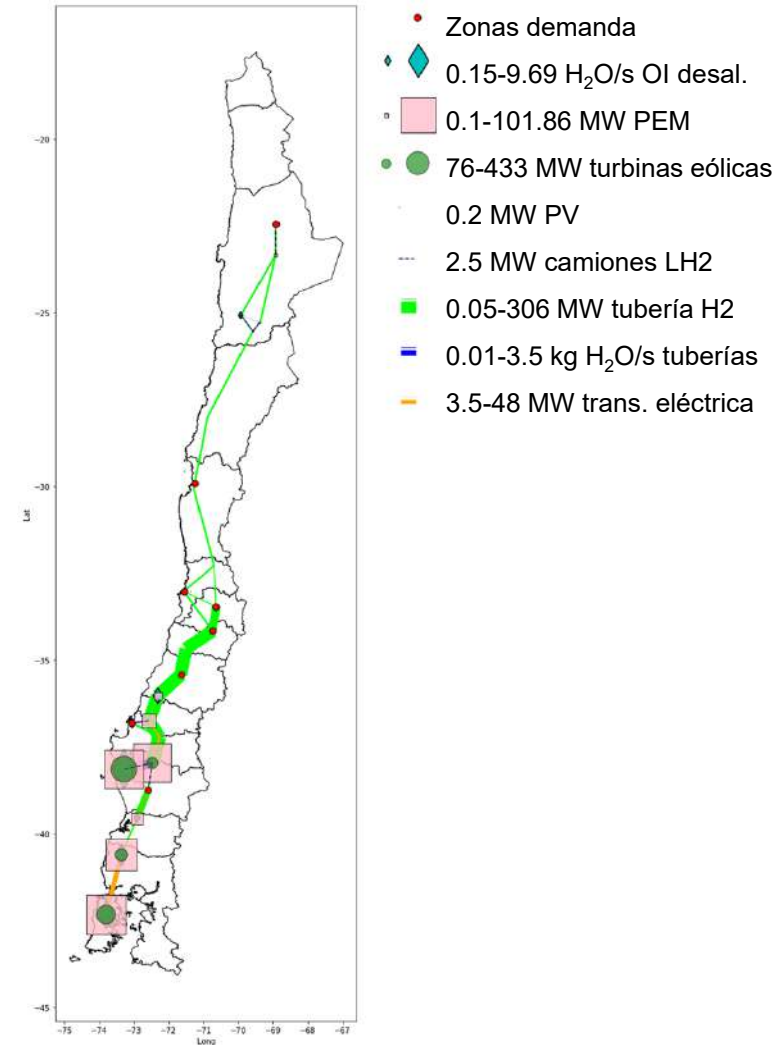
Resultados

- Escenario Exportación E1.20 año 2050
 - Mayores capacidades instaladas en tecnologías y transporte
 - Aumento de costos nivelados
 - Mantiene producción en zonas interiores
 - Incorpora camiones para transporte de H₂
 - Producción de H₂ en nuevas zonas



Resultados

- Escenario Demanda Interna E2 año 2050
 - Menores capacidades
 - Concentración infraestructura en el sur
 - Uso principalmente de fuentes eólicas
 - Producción de hidrógeno en zonas costeras y cercano a centros de demandas



Discusión costos

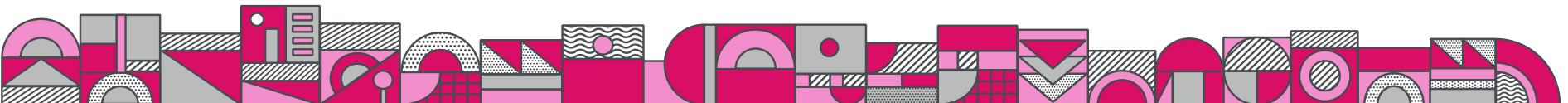
- Comparación de costos hidrógeno para exportación

Destino	Distancia (km)	LCOH ¹ calculado final (USD/kg)	LCOH ² H ₂ verde local (USD/kg)	LCOH ² H ₂ azul/gris local (USD/kg)	Competitividad versus producción local de H ₂ verde	Competitividad versus producción local de H ₂ azul/gris
Osaka, Japón	17500	6.86-7.01	6.89-7.31	3	X	X
LA, USA	8500	6.33-6.48	8.01-9.13	2-2.78	✓	X
Busan, Corea del Sur	17500	6.86-7.01	8.11-12.6	6.17	✓	X
Hamburgo, Alemania	14500	6.69-6.84	6.96-19.14	2.73	✓	X
Shanghai, China	18500	6.91-7.06	8.3-15.8	1.2-3.46	✓	X

¹Assumptions:

- Costo nivelado licuefacción: 1.5 USD/kg
- Costo nivelado transporte marítimo: Dependiente de distancia

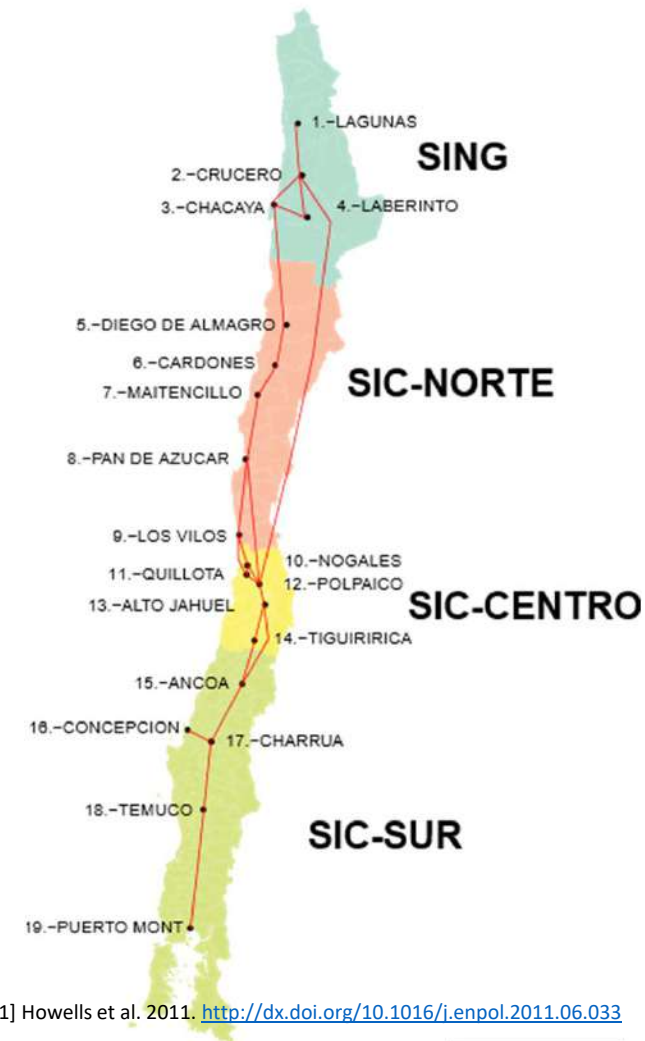
²Costos reportados en la literatura



Comparación con modelo on-grid

Metodología – Modelo on-grid

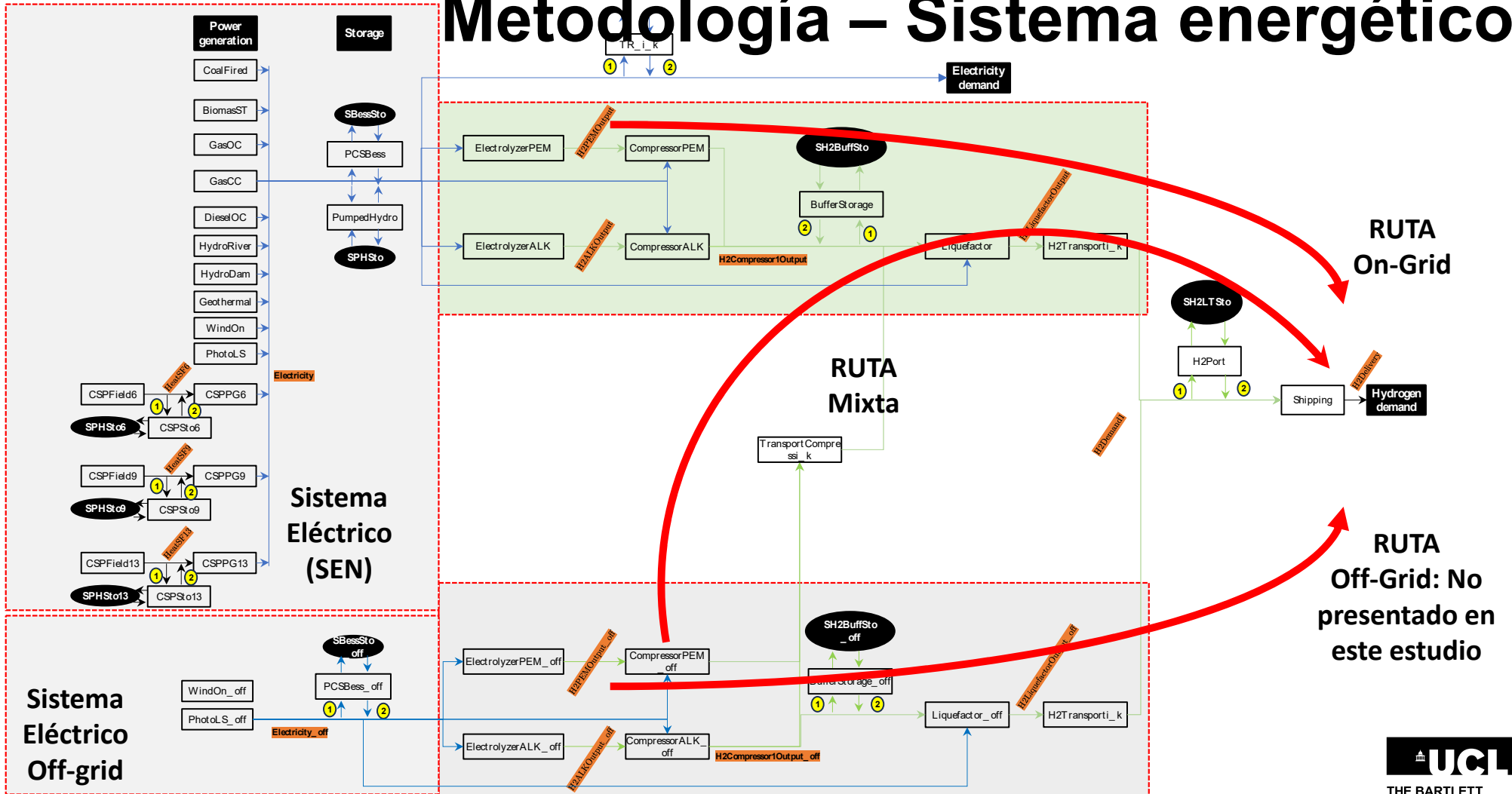
- Modelo de planificación energética OSeMOSYS [1].
- Optimización de costos en base al crecimiento y operación del sistema.
- 19 nodos y 23 líneas de transmisión.
- Períodos de inversión de 5 años (2025 al 2060).
- 4 días típicos con resolución horaria
- Demanda de H₂ escenario transición acelerada PELP.
- Potenciales de generación, capacidades instaladas, proyectos en construcción, costos de combustibles, disponibilidad horaria recursos VRE, CAPEX, OPEX.
- **Restricciones adicionales:** Límite de emisiones para todo el período de producción de hidrógeno de 28.2 gCO₂/MJ (UE)
- **Escenarios H2-Ref y H2-Limit:** producción on-grid **sin** y **con** límite de emisiones



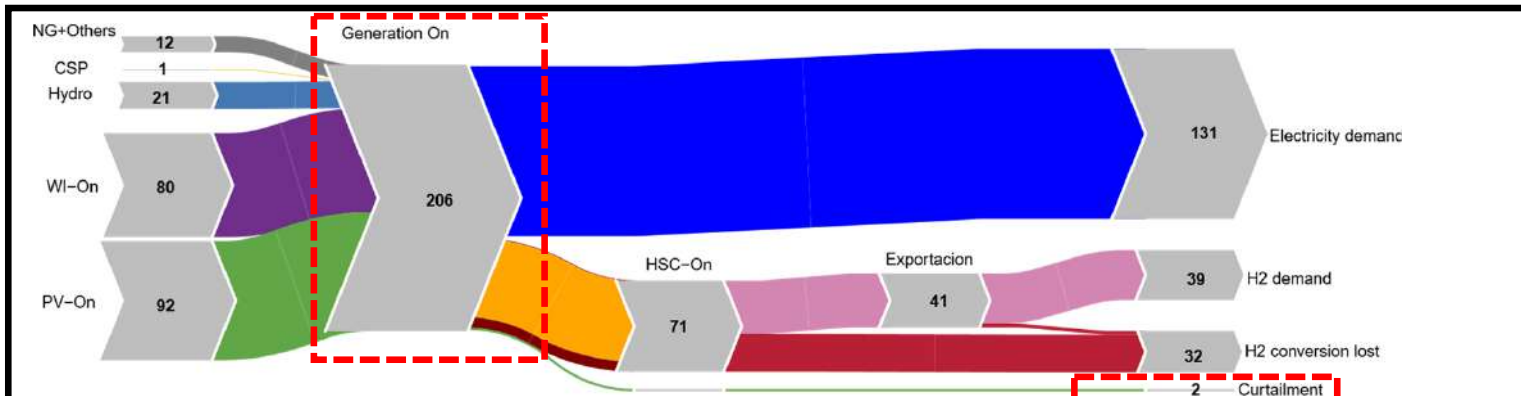
[1] Howells et al. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.033>



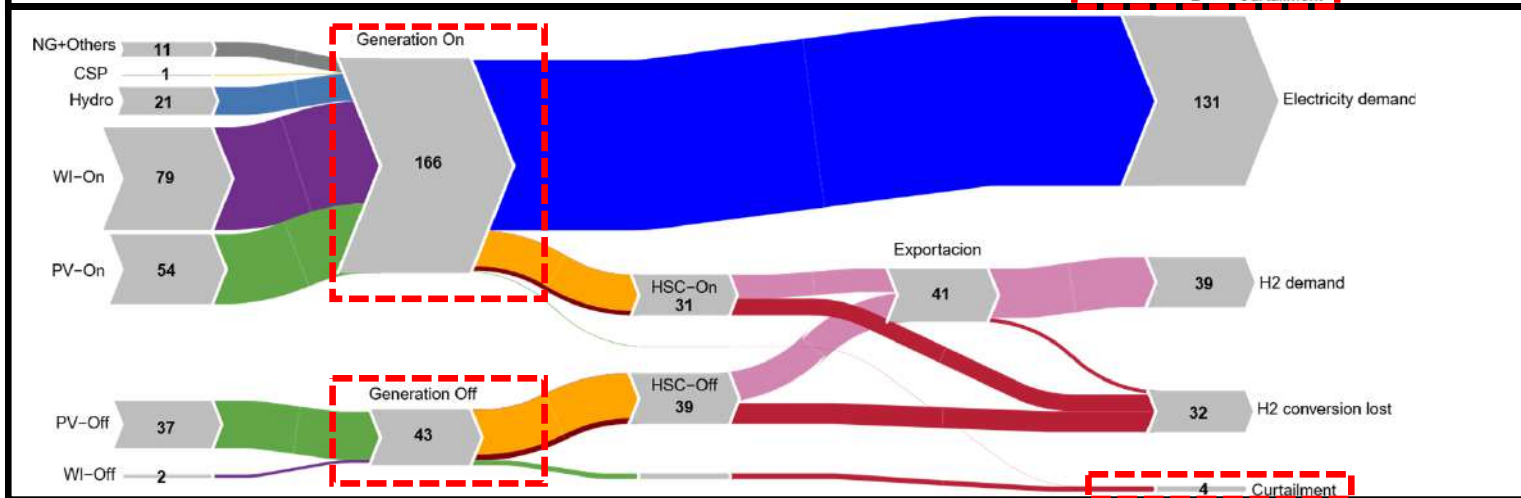
Metodología – Sistema energético



Resultados



Balance de energía al 2040
Escenario H2-Ref (TWh)



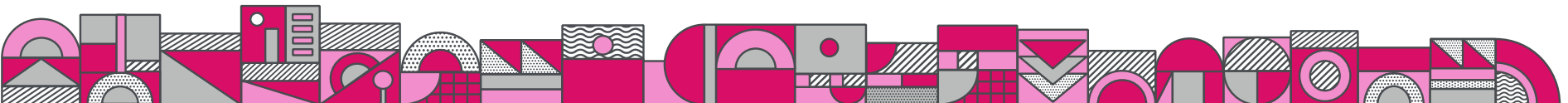
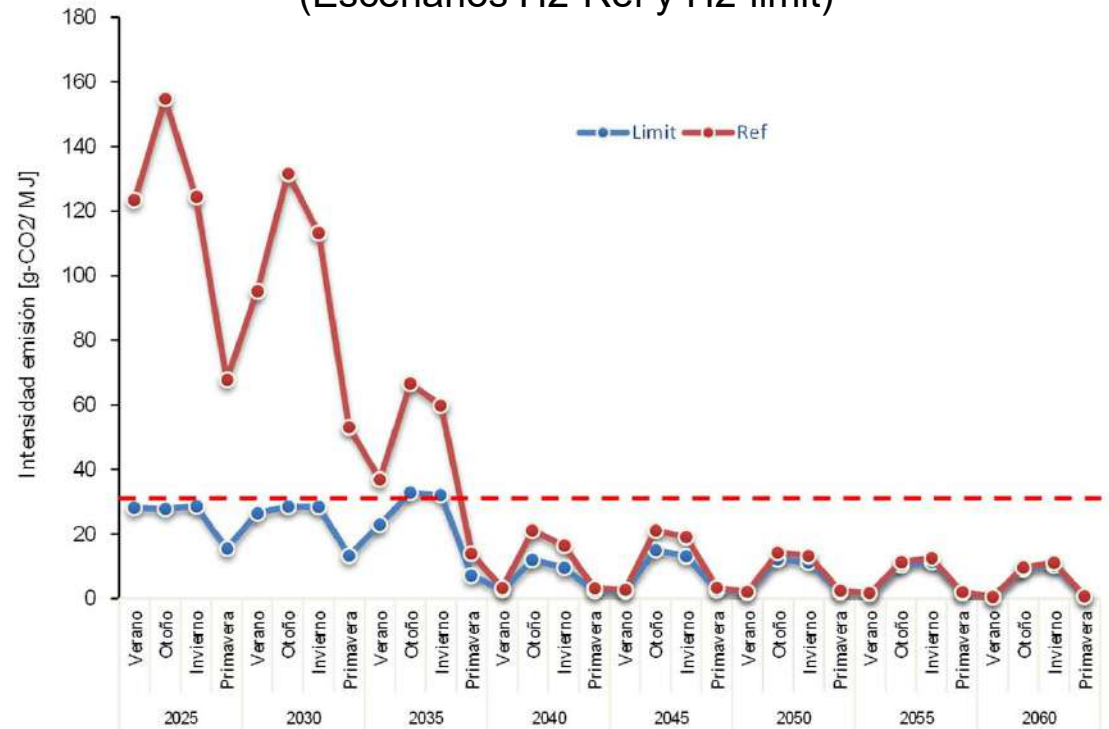
Balance de energía al 2040
Escenario H2-Lim (TWh)



Resultados

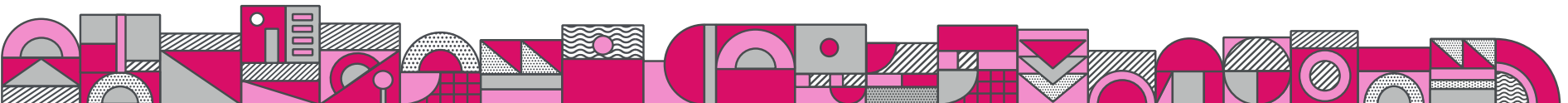
- LCOH:
 - H2-Ref: 3 USD/kg
 - H2-Limit: 3.14 USD/kg
 - (Anterior: 4.31 – 4.46 USD/kg)
 - H2_Limit: Factor de emisión no excede 28.2 gCO₂/MJ para

Factor de emisión de CO₂ en la producción de hidrógeno
(Escenarios H2-Ref y H2-limit)



Conclusión

- Supuestos diferentes (resolución espacial, puntos y escalas de demandas)
- LCOH:
 - Off-grid exportación: 4.31 – 4.46 USD/kg
 - Off-grid demanda interna: 6.26 USD/kg
 - On-grid verde: 3.14 USD/kg
- Configuración óptima cadenas de suministro H₂:
 - Off-grid exportación:
 - Concentrado en el norte: **PV**, eólico
 - Producción de hidrógeno en zonas interiores
 - Off-grid demanda interna:
 - Concentrado en regiones del sur: **eólico**
 - Producción cerca de desalinización y demanda (costera)
 - On-grid verde:
 - Concentrado en el norte: **PV**
- Competitividad para exportación:
 - Sensible a supuestos tecno-económicos
 - Potencialmente competitivo comparado a producciones locales de hidrógeno verde
 - No competitivo comparado a producciones locales de hidrógeno gris/azul
- Trabajo actual/futuro
 - Operación horaria para un año completo, inclusión de almacenamiento de hidrógeno y electricidad, y restricciones de operación de electrolizadores alcalinos
 - Impactos ambientales de producción de salmuera, y GWP de fugas de H₂
 - Escenarios de producción *off-grid* versus *on-grid*





Thank you for listening

Francisca Jalil-Vega, Research Fellow in Hydrogen Systems

ucl.ac.uk/bartlett/energy @UCL_Energy

